

氏 名	中 田 崇 行
生 年 月 日	
本 籍	石 川 県
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 643 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第 4 条第 1 項)
学位授与の題目	三次元環境における物体認識
論文審査委員(主査)	藤 原 直 史 (工学部・教授)
論文審査委員(副査)	神 谷 好 承 (自然科学研究科・教授) 勘 甚 裕 一 (工学部・教授) 泉 田 啓 (工学部・助教授) 包 躍 (横浜国立大学・助教授)

## 学 位 論 文 要 旨

### abstract

In this study, a method to detect position and orientation of an object is proposed. Therefore, two methods according to the feature of the acquisition data based on a sensor are proposed.

One method uses the 3D point data obtained by a laser range finder or stereovision camera. It matches three-dimensionally an object to its model object by repeating vote for the exact position and orientation of the object using three arbitrary points chosen from input data. Since both template data and input data are only information related a 3-dimensional point, it is simple for creation and acquisition of data, and has fewer influences from noise.

The other method uses only one 2D image data obtained normal CCD camera. However this method is able to the object that has a characteristic texture in a plane part, detection equipment is simple. It is a fundamental and important problem to detect weak perspective projection invariant image shape from a picture. Although there was the conventional method of using the tangent information on a figure outline, since the straight line figure was undetectable, we proposed the method of extracting an eternal axis for weak perspective projection conversion using the figure center of gravity. This method is applicable not only to curvilinear form but straight line form and the form containing both straight line and curve. However, For the method based on the result of center of gravity calculation, if a deficit occurs in the figure, the center of gravity will move and detection will become difficult. This paper proposes a new method without center-of-gravity calculation and it can detect a deficit figure.

3次元物体認識という、人間の持つ視覚機能をコンピュータによって実現することはコンピュータビジョンの重要な課題のひとつとなっている。モデルに対応する物体を画像中から検出し、その位置姿勢を決定する方法の確立は、生産ラインの自動化に大きく寄与する。特に顧客の製品ニーズの多様化に対応するため、多品種少量生産を必要とする現場からの早期実現を望む声は多く、広く研究が進められている [1][2][3][4][5][6][7][8][9]。また、動画像中から目的のシーンを見つけ出す用途等、その応用範囲も広い。しかし、簡便な設備のみでオブジェクトの位置姿勢を自動認識する方法はいまだ確立されておらず、依然として生産ラインの自動化は実現していない。本論文ではこの方法の確立を目的として、使用可能機器、被検出オブジェクトの特徴により、下記の異なる二つの方法を提案する。

(I) オブジェクト表面の3次元データを用いる検出法

(II) オブジェクトを撮影した、1枚のカメラ画像の情報のみを使用する検出法

(I)の方法は、オブジェクトの立体情報を得るためにレーザーレンジファインダや精密なステレオカメラによる3次元スキャンを必要とするが、オブジェクトの形状と位置姿勢に制約を設けない。これに対して (II)の

方法は、3次元環境内の平面の位置姿勢を検出する方式のため、オブジェクトには平面部分が必要であるが、その検出に必要な機器はカメラが1台だけであり、(I)と比較して利用しやすく安価であるという長所がある。

### (I) オブジェクト表面の3次元データを用いる検出法

これは、レーザーレンジファインダ等によって得られた物体表面の3次元情報と、あらかじめ用意した自由曲面体テンプレートを照合することにより、これらの中からオブジェクトの種類と位置姿勢を求める手法である。この手法はオブジェクトのデータ取得に特別な装置を必要とするが、画像そのものを扱わないため光源などの周辺環境の変化には強いという特徴がある。しかし位置姿勢計算に莫大な計算量とメモリを必要とするため、通常は物体の形状、位置姿勢に制約を設けていた[1]。本論文では、これらの制限を廃しながら、メモリと計算量の削減を図ったアルゴリズムを構築した。

- (a) 高雑音2次元画像からの直線検出の一手法に Hough 変換 [10] があるが、これを3次元に拡張した 3DHough 変換を用い、オブジェクトの位置姿勢の検出を行う。3DHough 変換はオブジェクトに含まれる平面の位置姿勢検出が可能である。さらに、この検出されたオブジェクトの平面形状と位置姿勢を認識することにより、オブジェクトの6自由度での位置姿勢の検出に成功した。

3DHough 変換は多数決原理による投票理論を利用したアルゴリズムであるため、遮蔽や雑音に対して頑健な検出が可能と言う特徴がある。しかし、あらかじめ平面を検出することが必要なこのアルゴリズムは、平面に特徴的な形状を持つオブジェクトのみが検出可能であるため、本論文では自由曲面オブジェクトを検出可能とするため、さらに次のアルゴリズムを提案する。

- (b) 高雑音2次元画像中の任意の輪郭形状を検出する手法に、一般化 Hough 変換 (以下 GHT)[11] が存在する。これを3次元に拡張して自由曲面オブジェクトに対応する手法が従来存在したが、以下の問題点が存在した。

- i. GHT は検出オブジェクト輪郭線の接線情報を正確に求める必要がある。従って3次元 GHT の場合は接平面情報となる。しかし3次元オブジェクトの場合は、雑音、センサの分解能、オブジェクト自身による隠蔽が原因となり、検出不能な表面データが多数生じるため、その算出は非常に難しい。
- ii. また、輪郭線の接線角を用いない方法として、GHT では輪郭上の点を複数組み合わせ、これらの幾何学的な関係をもとにテーブル作成、検出するという方法が提案されている [12]。しかし、3次元に拡張してデータ量が増えた場合、点を組み合わせるこの方法ではテーブルが爆発的に大きくなり、数 GigaByte にも達する。当然それに伴いこれらの作成、参照の時間も増加する。この短所は検出オブジェクトが複雑になるにつれて顕著となる。

これらの問題に対し、本論文では誤差の生じやすい接平面情報を用いないアルゴリズムを提案する。また、それに伴うテーブル容量の爆発を避けるため、Fig.1 のようにテンプレートを複数枚の平面にスライスし、各スライスごとに個別にテーブルを作成するというアルゴリズムを考案、必要メモリ量を抑えながら、自由曲面体の6自由度での位置姿勢を検出する手法を提案する。その手法を用いて実験を行い、Fig.2 のように検出に成功した。

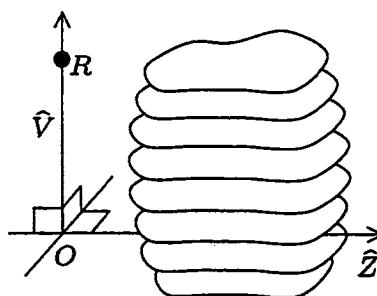


Figure 1: オブジェクトのスライスと  $R$ ,  $\hat{V}$ ,  $\hat{Z}$  の位置関係  
Relation of object's slices,  $R$ ,  $\hat{V}$  and  $\hat{Z}$

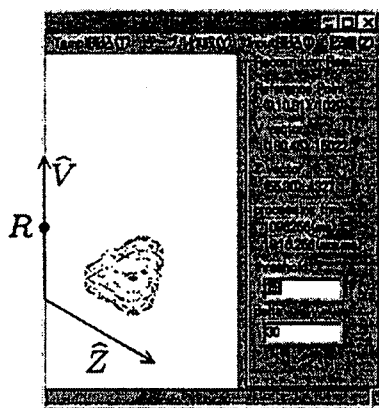


Figure 2: シミュレーション結果の例  
Simulation result

## (II) オブジェクトを撮影した、1枚のカメラ画像の情報のみを使用する検出法

ここまでの方法では、被検出物体、検出位置姿勢ともに制限はないものの、その検出にはオブジェクトの立体情報を得るためにレーザーレンジファインダや精密なステレオカメラによる3次元スキャンを必要とする。これらの制限を排し、カメラ1台によって同様のことを実現することを目的としてアルゴリズムを作成し、実験を行った。

3次元環境中の2次元パターンを任意の場所からカメラで撮影すると、それらの撮影画像は近似的に Fig.3 のように弱中心射影変換の関係となる [15]。そのため、これらのパラメータを求めることができれば2次元パターンの3次元中の位置姿勢を推定するための重要なデータとなる。

3次元環境内の任意の箇所に、あらかじめ登録されたパターンが描かれたオブジェクトが存在しているとする。このオブジェクトを任意の場所から撮影するとき、そのパターンとカメラ光軸の位置姿勢関係に対応して、取得されたテンプレート撮影画像は歪む。カメラ光軸とパターンの法線ベクトルが平行である場合、撮影される画像とテンプレートとの間には移動、拡大縮小、回転の変換関係しかない。この拘束条件下でのパターンマッチングは従来盛んに行われ、既に生産ライン現場において実用化されている。しかしこの拘束条件が全く存在しない場合、テンプレートと取得画像中のパターンとの間には、上記の変換関係に任意の一方向の拡大縮小が加わった関係、すなわち弱中心射影変換の関係が近似的に成り立つ。これは、正方形のテンプレートのみで平行四辺形状に歪んだパターンを検出することと同義であり、テンプレートが正方形ならば同じく正方形のパターンしか検出できない現在の実用化手法と比べて複雑さは大幅に増大する。そしてこの歪み、すなわち弱中心射影パラメータを検出することにより、3次元環境内にある、パターンの描かれたオブジェクトの位置姿勢を検出することが可能となる。この弱中心射影変換に不変な図形を認識可能な手法として、従来フーリエ記述子を使用するもの [13]、ニューラルネットワークを利用するもの [14]、幾何学的ハッシング [2] を利用するもの等の提案がなされてきた。その中で比較的新しいものに、弱中心射影変換では接線の平行性が失われないことを利用し、この情報

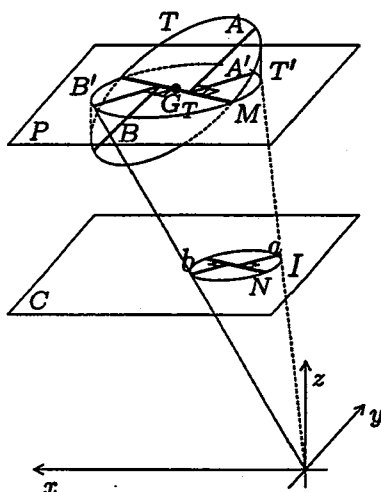


Figure 3: 弱中心射影  
Weak perspective projection

を投票することによって検出するという研究がある [3]。しかしこの研究は接線の角度が必要なため、直線で構成されている図形を検出することは原理的に不可能であった。

そこで本論文では、輪郭部分の接線情報を利用しない新しい方法を提案する。この方法は弱中心射影変換されたパターン画像から、前述の”任意の一方向の拡大縮小”の方向角をまず抽出する。そして、その方向角によって定められた軸から輪郭までの長さを測ることにより、残りの拡大縮小比、すなわち弱中心射影パラメータを決定する。

この方法は接線を必要としないため、曲線形状のみでなく直線や直線と曲線が混在する図形にも適用可能である。また長さを測るのみのアルゴリズムのため、従来手法に比べて高速かつ省メモリである。本論文ではこの提案手法を用いて実験を行い、その有効性を示す。Fig.4 をテンプレート  $T$  とし、その  $T$  を三次元環境内の任意の位置から撮影して得た Fig.5 の画像より、 $T$  がどこにあるか検出する。結果は Fig.6 のように、概ね正しい位置が検出されていることがわかる。

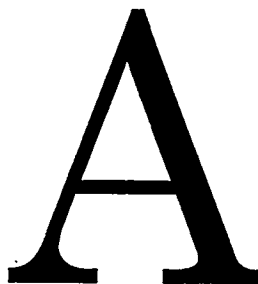


Figure 4: テンプレート画像  $T$   
Template image  $T$

また、従来の弱中心射影変換に不変な図形の検出法は、現在の実用化手法に比べて複雑なため、遮蔽を含んだ画像の検出を極端に苦手としていた。

本論文では、対象画像を平行線で  $n$  等分し、その  $n$  個の断面の長さを統計的処理、欠けた部分の値を棄却することにより、遮蔽画像の弱中心射影パラメータを検出する手法を提案した。実験では、Fig.7 のように、前方に遮蔽物があり、オクルージョンが生じている画像に対してもその有効性を示した。

この論文で挙げたアルゴリズムを実際のシステムに適用するべく改善を行っていくことで、将来、生産ラインにおける完全自動化に大きく寄与することができると考えている。

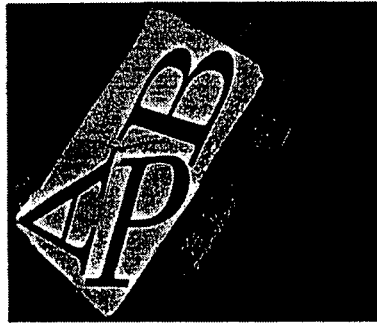


Figure 5: 入力画像  $C$   
Input image  $C$



Figure 6: 検出結果  
Detecting Result



Figure 7: 検出結果  
Detecting Result

## References

- [1] 天野敏之, 井口征士, “距離画像を用いた固有空間法による物体探索,” 信学論, Vol.J83-DII, No.2, pp.584-592, 2000
- [2] Y. Lamdan, J.T. Schwartz, and H.J. Wolfson, “Affine invariant model-based object recognition,” IEEE Trans. on Robotics Automation, vol.6, no.5, pp.578-589, 1990
- [3] 木村彰男, 渡辺孝志, “アフィン変換に不変な任意図形検出法として拡張された一般化ハフ変換,” 信学論, Vol.J84-DII, No.5, pp.789-798, 2001
- [4] 佐藤 嘉信, 田村 進一, パラメータ化モデルを用いた 3 次元物体認識: Hopfield モデルによる並列探索アプローチ, 情報学論, Vol.31, No.1, pp.56-57, 1990
- [5] 深田 陽司, 部分エッジを用いた物体の高増幅弁と認識, 信学論 (D-II), Vol.J76-DII No.6, pp.211-220, 1993
- [6] 角 保志, 富田 文明, ステレオビジョンによる 3 次元物体の認識, 信学論, Vol.J81-D-II No.4, pp.1105-1112, 1997
- [7] 大場光太郎, 池内克史, “局所固有空間手法による金属物体の安定認識,” 信学論, Vol.J80-DII, No.12, pp.3147-3154, 1997
- [8] N.Guil, J.R.Cozar, E.L.Zapata, “Planar 3D Object Detection by Using the Generalized Hough Transform,” 10th of Int'l Conf. on Image Analysis and Processing, 1999.
- [9] 木村 彰男, 渡辺 孝志, 高速一般化ハフ変換-相似変換不変な任意図形検出法, 信学論 (D-II), Vol.J80-D2 No.5, pp.726-734, 1998
- [10] P.V.C.Hough, Method and means for Recognizing complex patterns, U.S. Patent 3069654, 1962
- [11] D.H. Ballard, Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes, Pattern Recognition, Vol.13, No.2, pp.111-122, 1981
- [12] 斉藤文彦, “直角三角形の相似性に着目した図形マッチングによる 2 次元部品姿勢認識,” 信学論, Vol.J81-DII, No.7, pp.1591-1600, 1998
- [13] 宮武孝文, 松山隆司, 長尾真, “フーリエ記述子を用いたアフィン変換に不変な曲線の認識について,” 情報学論, Vol.24, No.1, pp.64-71, 1983
- [14] Bebis G., Georgiopoulos M., da Vitoria Lobo N., Shah M., “Learning affine transformations,” Pattern Recognition, Vol.32, no.10, pp.1783-1799, 1999
- [15] 徐剛, 辻三郎, “三次元ビジョン,” 共立出版, 1998.

## 学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関して、平成 16 年 1 月 30 日に第 1 回審査委員会を開き、面接調査を行った後、論文内容を詳細に検討した。さらに、平成 16 年 2 月 5 日に行われた口頭発表の後に第 2 回審査委員会を開き、協議の結果以下のように判定した。

本論文は 3 次元環境内でのオブジェクトの位置姿勢をより簡便な装置でモデルベースドマッチングを行うことに関する研究である。使用するセンサの種類や用途に応じて 2 種類のアルゴリズムを提案し、理論的、実験的に考察している。システムとして① 3 次元スキャンを用いて自由曲面オブジェクトの検出を行う方法と、② カメラ 1 台によりオブジェクト平面部分パターンの位置姿勢検出を行う方法を提案している。①においては投票アルゴリズムを用いながら、3 次元に拡張することによるテーブル数の激増を抑制するアルゴリズムを考案している。②においては 2 次元パターンと 3 次元環境内に置かれたその 2 次元パターンを任意の位置から撮影した画像とは弱中心射影変換の関係に近似できることを利用して、この検出を行うアルゴリズムを作成している。従来の研究は接線を用いるため直線、曲線の混じったパターンを不得意としていたが、重心算出と不変軸抽出によりこれらを含むパターンの検出方法を可能としている。さらに、この方法を発展させ、重心を使用せず統計的处理によって欠損部分を含むパターンの検出を可能にしている。①②ともこれらのアルゴリズムを用いて実験を行い、目的のオブジェクトを検出することを確認している。よって本論文は博士（工学）論文に値する。